

# DURABILIDAD DE HORMIGONES CON AGREGADOS RECICLADOS

## DURABILITY OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETES

L.R. Santillána<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Becario Doctoral CONICET, LEMIT. [lautarorsantillan@gmail.com](mailto:lautarorsantillan@gmail.com)

### RESUMEN

En los últimos años, se ha extendido la utilización de agregados reciclados (AR) para la elaboración de nuevos hormigones, dado que resulta una práctica sustentable con el medio ambiente y, en determinadas condiciones, una solución económica. En algunas regiones del mundo su utilización en la producción de hormigón estructural ya se encuentra normalizada, mientras que en otras existe aún una gran preocupación por parte de los profesionales al momento de cumplir con los requisitos de durabilidad. Aunque existen numerosas investigaciones que dan cuenta de las adecuadas propiedades mecánicas del hormigón reciclado (HR), los aspectos durables de este material no están del todo comprendidos. Existen diversas patologías o tipos de ataque vinculados con la durabilidad de un hormigón, y en cada uno de ellos las propiedades del AR pueden influir de manera particular y diferente. Resulta fundamental conocer de qué manera el AR modifica las propiedades durables del HR, a fin de tomar en cada caso los recaudos necesarios para elaborar un hormigón reciclado con prestaciones durables satisfactorias.

**Palabras clave:** Durabilidad; Hormigón reciclado; Agregados reciclados.

### ABSTRACT

In the last years, the use of recycled aggregates for new concrete production has increased, as it is a sustainable practice and, in some cases, an economical solution. In some regions of the world, its use for structural concrete production is already standardized, whereas in other regions there is still a general concern by concrete producers when they have to fulfill durable requirements with this material. Although many publications are confirming adequate mechanical properties of recycled concrete, the durable performance of this material is not totally understood. There are several specific pathologies or types of attack in relation with concrete durability, and in each case, recycled aggregate properties can

play a different role. It is important to understand how recycled aggregates modify the durable properties of recycled concrete, to take specific provisions at the moment of designing a recycled concrete with satisfactory durable performance.

**Keywords:** *Durability; Recycled concrete; Recycled aggregates.*

## INTRODUCCIÓN

El uso de agregados reciclados (AR) provenientes de la trituración de hormigón residual es una práctica creciente en la actualidad, particularmente en países con estrictas políticas ambientales. Por un lado se reduce el volumen de desechos de demolición destinados normalmente a los vertederos, mientras que por otro lado se reduce el impacto ambiental de la construcción al disminuir el consumo de depósitos naturales de agregados y la explotación de canteras.

Los ARs tienen características diferentes a las de los agregados naturales (AN), principalmente debido a la presencia de mortero adherido en sus partículas [1–4]. De esta forma, mientras las propiedades del AN dependen de las características de la roca de origen, las propiedades del AR están relacionadas con el AN utilizado y las características propias del hormigón de origen [5–7]. Existe un consenso general de que los AR tienen propiedades desfavorables en relación a los AN, como menor densidad, menor resistencia al congelamiento, menor resistencia a la abrasión, mayor contenido de material fino y mayor absorción. Como resultado, las dosificaciones y las propiedades en estado fresco del hormigón reciclado (HR) pueden variar de las de un hormigón con agregados naturales (HN) si las mismas no son tenidas en consideración [8–13].

La influencia del AR en las propiedades mecánicas del HR ha sido estudiada ampliamente. En general, se señala que reemplazos de hasta un 30% de AR en lugar de AN no producen cambios significativos en las propiedades mecánicas del nuevo hormigón [6,10,14–16]. Sin embargo, algunos estudios han indicado que reemplazos de hasta un 75% no producen cambios significativos

en las propiedades del HR [17–19].

En cuanto al desempeño durable de los HR, existen discrepancias y resultados contradictorios en la bibliografía existente. Esto puede estar relacionado con los efectos opuestos que tiene el AR en la estructura de poros y en los mecanismos de transporte del nuevo hormigón: mientras que por un lado puede generar mejoras en la zona de interfaz agregado-mortero nuevo [20], por otro lado aumenta la porosidad total del nuevo hormigón, al aumentar el contenido relativo de mortero [21]. Además, las propiedades del hormigón de origen (como nivel resistente, tipo de cemento, tipo de AN, etc.) pueden modificar significativamente los efectos que el AR tenga en el desempeño durable del nuevo hormigón, dependiendo del mecanismo de degradación y de las condiciones de exposición. Este trabajo recompila datos existentes en la literatura, e incluye resultados experimentales propios, que apuntan a comprender los mecanismos durables de los HR bajo distintos entornos agresivos, como la permeabilidad a los cloruros, el ataque por sulfatos, reacción álcali-sílice, congelamiento y deshielo, y exposición a altas temperaturas.

## DESARROLLO

### - Permeabilidad a los cloruros

El problema de durabilidad vinculado al ingreso de cloruros, afecta en realidad al acero del hormigón armado y no al hormigón en sí. A determinada concentración de iones cloruro en las inmediaciones de la armadura, se produce la despasivación de la misma y comienza el proceso de corrosión. El hormigón resulta entonces en una

protección para las armaduras frente al ataque de los cloruros. La tasa de ingreso de cloruros en un hormigón está gobernada principalmente por la porosidad del mismo: a mayor porosidad, mayor es la tasa de ingreso de cloruros. Sin embargo, el hormigón tiene otra propiedad que influye en este proceso, que es la capacidad de fijación de iones cloruro. Una parte de los iones que ingresan en la matriz del hormigón son fijados por la pasta de cemento del mismo, quedando inhabilitados para atacar a la armadura, por lo que una mayor capacidad de fijación de iones cloruro, a igualdad de otros factores, se traduce en una mayor resistencia del hormigón a la penetración de los cloruros [22–24].

El reemplazo de AN por AR aumenta la porosidad del HR debido al mortero adherido en sus partículas [21], por lo que en principio aumentarían la tasa de ingreso de los iones cloruro. Por otro lado, el mayor contenido de pasta de cemento que aporta el AR representaría una mayor capacidad de fijación [24], lo cual resulta en una propiedad positiva. Aunque existen numerosos estudios que evalúan la resistencia del HR a la penetración de cloruros, no existe un consenso absoluto respecto a la influencia del AR. Varios autores señalan que el uso de AR redujo levemente la resistencia del hormigón a la penetración de cloruros [5,20,25,26], mientras que otros señalan que no se observaron diferencias entre el HN y HR [27,28]. La Figura 1 muestra una compilación de resultados de diferentes estudios. Se observa una caída de la resistencia al ingreso de cloruros al aumentar el contenido de AR, pero una influencia mucho mayor de la relación agua-cemento (a/c) o de la utilización de materiales cementicios suplementarios (MCS).

La permeabilidad a los cloruros de un hormigón puede determinarse midiendo el contenido de cloruro a distintas profundidades (perfil de ingreso) en probetas inmersas en solución durante determinados periodos de tiempo. A partir de ello es posible la determinación del coeficiente de difusión aparente de cloruro. También puede evaluarse indirectamente por métodos acelerados

de migración de cloruros, como el especificado por la norma ASTM C1202 [29]. La mayoría de los autores que han estudiado la resistencia a la penetración de cloruros en HR han utilizado métodos acelerados. El problema con estos tipos de ensayos es que se realizan en periodos cortos de tiempo, y no dan tiempo para que se produzca la fijación de los iones cloruro en la matriz de cemento. Esto resulta en una subvaloración de la resistencia a los cloruros por parte de los HR, que por tener mayor contenido de pasta de cemento pueden tener mayor capacidad de fijación. Además, los métodos utilizados en condiciones de laboratorio no representan exactamente las condiciones a las que son expuestas las estructuras reales, que en general tienen estados de saturación parcial y no total, y en éstas juegan un papel importante otros factores como el viento, lluvias, presencia de sulfatos y variación de las concentraciones. Por ejemplo, Villagrán et al. [28] evaluaron hormigones con AN y AR expuestos a condiciones reales de ambiente marino, y a determinados periodos de tiempo realizó perfiles de ingreso de cloruros solubles en agua y totales. Encontraron que para relaciones a/c iguales o superiores a 0,40, no hubo diferencias entre el contenido de cloruro de las probetas de HN y las de HR, mientras que para hormigones con relación a/c menores a ese valor el uso de AR aumentaba notablemente la tasa de penetración. Además, pudieron comprobar una mayor capacidad de fijación de los hormigones con AR.

Zega et al. [30], por su parte, estudiaron la permeabilidad a los cloruros de hormigones reciclados con distintas relaciones a/c y diferentes contenidos de AR, y estos a su vez provenían de hormigones elaborados con distintos tipos de AN (graníticos, basálticos y cuarcíticos, obtenidos por trituración de rocas, y agregados silíceos de tipo canto rodado). Luego de exponer estos hormigones por 140 días a una solución de 50g/l de cloruro de sodio, se realizaron perfiles de ingreso de cloruros solubles y totales. Se encontró que el contenido de AR tuvo una influencia mucho menor a la relación a/c del HR. Además se observó una influencia muy

baja del contenido de AR, teniendo inclusive en algunos casos menor permeabilidad a los cloruros que los hormigones de control: en hormigones con AR de base cuarcítica y silícea. Esto puede deberse a que la absorción de agua por parte de los AR modifique la relación a/c efectiva en el nuevo hormigón, al haberlos empleado en estado de humedad secos al aire, y a la mejora en la interfase que puede producirse por el uso de los mismos.

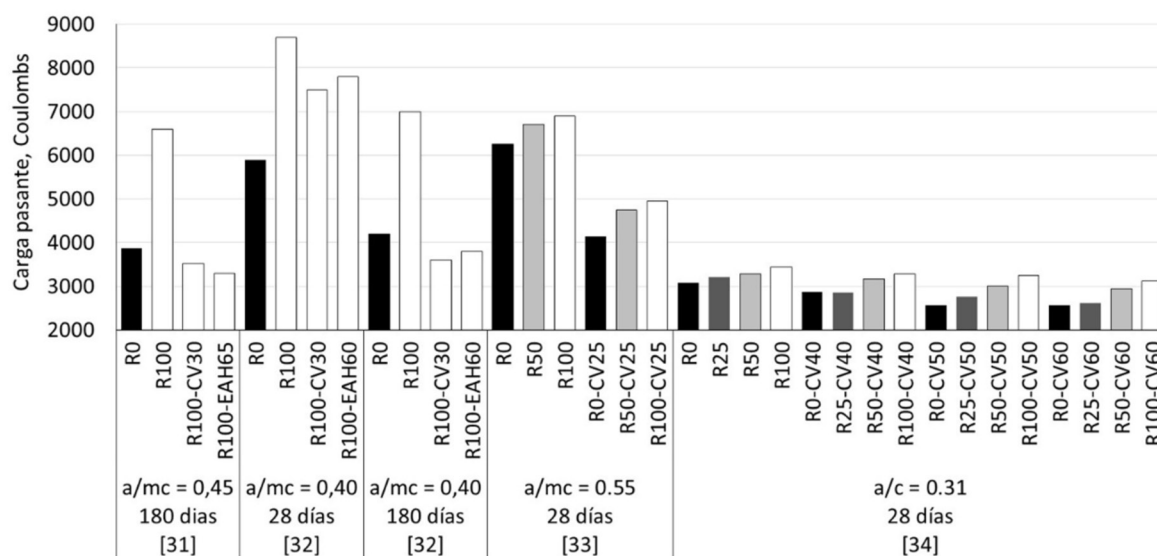
Varios autores han demostrado que el uso de algunos materiales cementicios suplementarios (MCS), como ceniza volante o escoria de alto horno, que tienen la capacidad de incrementar la tortuosidad de la red capilar de la pasta de cemento por efecto de la reacción puzolánica, permite obtener HR con resistencia a la penetración de cloruros aún mayores que hormigones similares con AN [31,35,36]. Otsuki et al. [20] demostraron que la técnica de “doble mezclado” mejora la resistencia a los cloruros del HR, dado que mejora la calidad de las interfaces, especialmente en hormigones con elevada relación a/c.

daño generado por productos expansivos generados en el interior del hormigón por una reacción química entre algunos compuestos de la pasta de cemento hidratada e iones sulfatos que provienen del exterior (ataque externo por sulfatos) [37]. Al igual que la mayoría de los problemas vinculados a la durabilidad, el ataque externo por sulfatos (AES) se encuentra fuertemente gobernado por la porosidad del hormigón, donde los iones sulfato penetran en el hormigón por el fenómeno de difusión. Por otro lado, es posible controlar el AES utilizando cementos de cuya hidratación resulte poca cantidad de compuestos reactivos con el sulfato (cementos con bajo contenido de  $C_3A$ , y con baja relación  $C_3S/C_2S$ ). En este caso, el uso del agregado grueso reciclado (AGR) presenta entonces un doble problema: por un lado incrementa la porosidad, aumentando la tasa de ingreso de iones sulfato; por otro lado, el contenido de productos de hidratación del cemento resulta mayor, pudiendo aumentar la disponibilidad de compuestos capaces de reaccionar con los iones sulfato.

## - Ataque por sulfatos

El ataque por sulfatos se refiere específicamente al

La bibliografía sobre HR expuestos a este tipo de ataque es muy escaza, por lo que aún se dista de lograr obtener una comprensión de la influencia



**Figura 1.** Incidencias de la relación a/c, contenido de AR y utilización de MCS en el ingreso de cloruro, evaluado con el ensayo ASTM C1202 [31–34].

que el AR tiene en el desarrollo del ataque. Este hecho es debido en parte al gran número variables intervinientes, tales como tipo de cemento, porosidad general, concentración de sulfatos, catión asociado, temperatura, forma de las probetas, condiciones de ensayo, entre otras, a las cuales se deben sumar las características propias del AR, principalmente el tipo de cemento y la porosidad de la pasta adherida. Además, se debe considerar que aún no existen procedimientos normalizados para evaluar la resistencia del hormigón con agregados naturales al ataque por sulfatos, encontrándose una gran variedad de posibilidades como la determinación de la expansión, cambio de peso, modificación del módulo de elasticidad dinámico, valoración de la resistencia mecánica, etc. A lo mencionado anteriormente se debe agregar la falta de reciprocidad de los métodos de ensayo empleados en laboratorio, los cuales generalmente consideran elevadas concentraciones de sulfato y un estado de saturación permanente, con el desempeño de los hormigones en estructuras reales, donde el estado de saturación es parcial y las concentraciones son variables en el tiempo. Estas últimas son condiciones óptimas para el desarrollo del ataque físico por cristalización de sales, en contraposición a las de los métodos de laboratorio que representan condiciones para un ataque netamente químico.

Con relación al desempeño de los HR expuestos en sulfatos, algunos autores han observado una resistencia levemente menor que la del hormigón con agregados naturales [32,38–41]. Dhir et al. [39] estudiaron hormigones con diferentes contenidos de AGR, y encontraron que hasta un 30% de uso de AGR las expansiones resultaron similares a las del hormigón de control. Vale aclarar que estos resultados corresponden a hormigones con baja resistencia (elevada relación  $a/c$ ), bajas concentraciones de sulfato (0,3 g/l) y en cuya elaboración se emplearon materiales cementicios suplementarios. Bulatovi et al. [40] evaluaron hormigones con 100% de AGR, en los cuales utilizaron diferentes tipos de cemento (ARS y normal), distintas relaciones  $a/c$  y diferentes

tipos de sales de sulfato (de sodio y de magnesio). Encontraron una influencia negativa considerable del AGR solo en los hormigones con cemento Portland normal y elevada relación  $a/c$ , mientras que en los restantes hormigones no detectaron expansiones mayores ni caídas considerables en la resistencia mecánica, luego de 1 año de exposición. La Figura 2 compila resultados informados en la literatura con relación al desempeño de probetas de hormigón reciclado expuestas a solución de sulfato de sodio.

En otros estudios se ha evaluado el comportamiento de morteros con agregado fino reciclado (AFR), lo que se traduce en menores tiempos de evaluación. Lee [42] y Lee et al. [43] han ensayado morteros con distintos contenido de AFRs de distinta absorción, expuestos a soluciones de sulfato de sodio y de magnesio al 5% durante 1 año. Por un lado, informan mayor expansión en los morteros elaborados con AFR de mayor absorción. Por otro lado, encontraron que los morteros con reemplazos de hasta un 50% de AFR presentaron expansiones menores que las del mortero de control, mientras que para reemplazos superiores al 50% las expansiones fueron mucho mayores a las del mortero de control, llegando al máximo valor para un reemplazo de 100%. Un comportamiento similar al mencionado anteriormente fue encontrado por Santillán et al. [44] al evaluar morteros elaborados con distintos tipos de cementos y con 0, 30 y 50% de reemplazo del AN por AFR. También contempló el empleo de probetas con dos relaciones de distinta esbeltez expuestas en solución de sulfato de sodio (50 g/l) durante 1 año. Encontraron una influencia nula del contenido de AFR para morteros con cemento de bajo contenido de  $C_3A$ , mientras que para morteros con cemento de elevado  $C_3A$  se observó una influencia negativa del contenido de AFR, pero no en forma proporcional: en las barras poco esbeltas, observaron mayor expansión a mayor contenido de AFR, mientras que en las barras más esbeltas observaron mayor expansión para un 30% de AFR, presentando el mortero con 50% de AFR una expansión similar a la del mortero de control. Una hipótesis para explicar este comportamiento

radica en el doble efecto que tiene la porosidad aportada por el AFR: por un lado aumenta la tasa de penetración de iones sulfato acelerando el ataque, mientras que por otro lado ofrece mayor espacio para la deposición de productos de reacción, retrasando la generación de tensiones internas y la consecuente expansión (menor restricción interna). La forma de la probeta, la temperatura y la concentración son parámetros que influyen en la cinética del AES [45,46], pero el uso de AFR introduce nuevas variables que afectan a la cinética del ataque mediante su influencia en la restricción interna, y cuya participación no ha sido aún del todo comprendida.

El uso de MCS mejora notablemente la resistencia al ataque por sulfatos del HR, logrando en muchos casos mejor desempeño que el hormigón de referencia [38,41,48]. Esto se debe a que la actividad puzolánica de los MCS disminuye

fuertemente la porosidad de la matriz, reduciendo la tasa de ingreso de iones sulfatos, mientras que por otro lado consume la portandita disponible para reaccionar con el sulfato para generar yeso. También existen algunos estudios que emplean AR pre-tratado, embebiéndolos en soluciones concentradas con cemento, distintos MCS, e inclusive con compuestos no tradicionales de la industria del hormigón. Estos informan un mejor desempeño de las mezclas con AR pre-tratado, alcanzando desempeños similares a los de un hormigón de AN frente al ataque por sulfatos [47,49].

Como fuera mencionado anteriormente, en la gran mayoría de las estructuras reales, los hormigones se encuentran sometidas a estados de saturación parcial y variable, lo que genera las condiciones propicias para la cristalización de sales y en consecuencia un ataque físico, que se combina con

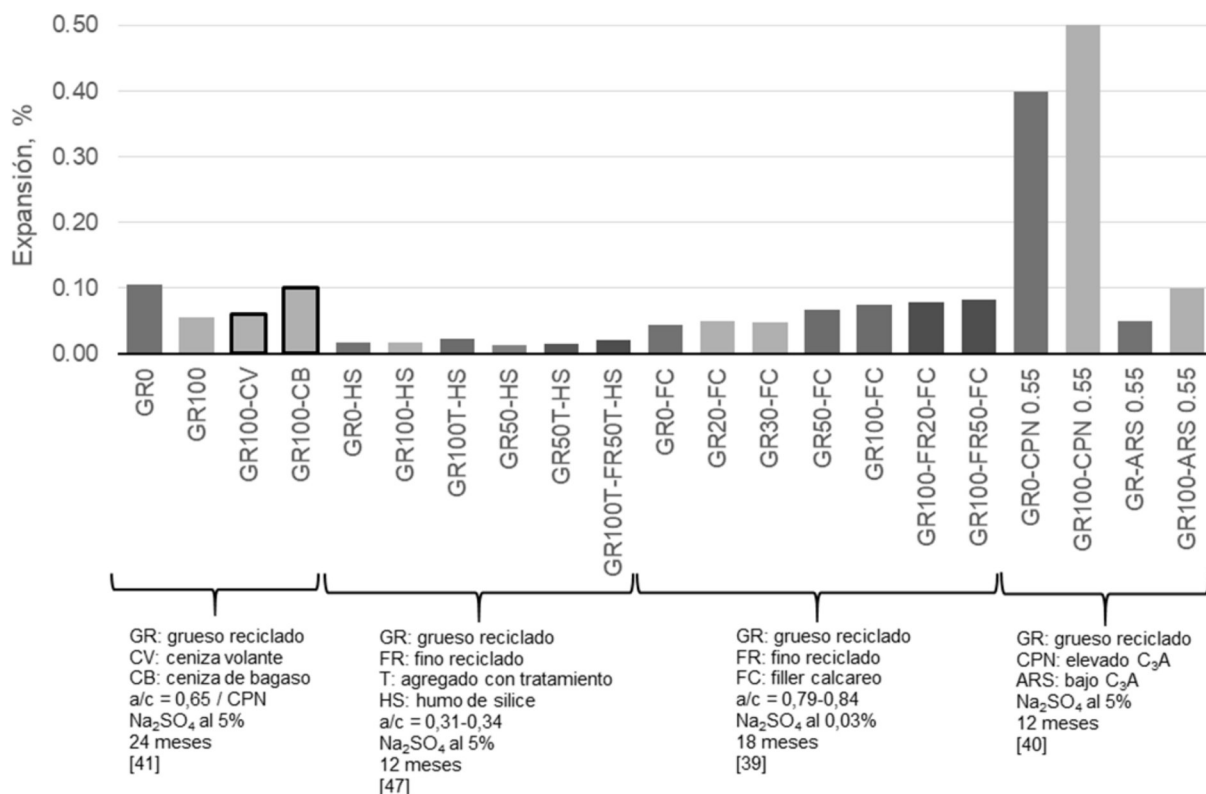


Figura 2. Expansión de HR y HN sumergidos en soluciones de sulfato de sodio [39–41,47].



el ataque químico [50–52]. Zega et al. [53] han presentado un seguimiento de probetas de distintos hormigones reciclados, semi-enterradas en un suelo con elevada concentración de sulfatos (1% p/p) durante un periodo de 10 años. Elaboraron dos series de HR, la “Serie 1” diseñada con criterio de durabilidad (baja relación a/c y aire incorporado) y la “Serie 2” diseñada sin criterio de durabilidad (alta relación a/c). Para ambos casos realizaron reemplazos desde 0 a 100% del AN por AGR. Tras 10 años de seguimiento, para la “Serie 1” no se observó ningún tipo de daño, aún para un 100% de AGR. Por otro lado, en la “Serie 2” no se observó una caída en el desempeño de los hormigones con 25% de reemplazo, respecto al hormigón de referencia, mientras que se encontró una caída muy leve del desempeño en hormigones con reemplazos mayores. Estos resultados refuerzan la hipótesis de que el uso de AGR no tiene mayores perjuicios en la resistencia del hormigón al ataque por sulfatos.

### - Reacción álcali-sílice

La reacción álcali-sílice (RAS) se produce en el hormigón por la presencia de agregados con potencial reactividad (sílice reactiva), álcalis (generalmente aportados por el cemento) y humedad. Como resultado de la interacción entre estos componentes, se forma un gel con capacidad de absorber agua y expandirse generando tensiones internas y deterioro en el hormigón [54]. Al utilizar AR podríamos estar aportando al nuevo hormigón dos de los componentes necesarios para la ocurrencia de la reacción, por un lado sílice reactiva, presente en algunos de los agregados constituyentes del hormigón de origen, y por otro lado álcalis, proveniente de la pasta de cemento endurecida. En el caso que el hormigón de origen haya experimentado daño debido a la RAS, resultaría necesario conocer si la reacción se detuvo o no, y en el caso de que sí, si la reacción se detuvo por falta de disponibilidad de álcalis libres en el sistema o por el consumo de toda la sílice reactiva. También se puede dar la situación en la cual, aún con presencia de álcalis y sílice reactiva,

no se haya producido la reacción en el hormigón de desecho debido a la inexistencia de humedad. Ante esta situación, al generar el AR y emplearlo en un hormigón que estará en contacto con humedad se pueden dar las condiciones ideales para que se genere la RAS, considerando además los álcalis que se aporten en la nueva matriz.

En cuanto al aporte de álcalis, Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez [55] han calculado que el máximo aporte de álcalis que puede realizar un AGR es de aproximadamente 2,8 kg/m<sup>3</sup>, lo cual es ligeramente mayor al límite considerado como seguro para evitar la RAS. Esto significa que la reacción podría darse en un HR aun usando un cemento de bajo álcalis. Distinto es el problema si el AR aporta sílice sin reaccionar. Esto podría darse en el caso de un hormigón dañado por RAS en el que el proceso se haya detenido por un consumo de todos los álcalis disponibles, o en el caso de que el hormigón de origen tenga agregado reactivo pero un cemento de bajo álcalis. Este aporte puede estar dado por el agregado grueso natural del hormigón original o por el mortero adherido (más específicamente por sílice reactiva en el agregado fino del hormigón de origen), tal como ha sido evaluado por Etcheberry et al. [56]. También puede darse el caso que en el proceso de trituración del hormigón original queden expuestas nuevas caras del agregado natural con potencial reactividad que no se encontraban expuestas anteriormente [57]. No existen muchos resultados en la bibliografía, ni una tendencia definida en cuanto a los efectos de un AR potencialmente reactivo sobre el desarrollo de la RAS en el hormigón reciclado.

Existen algunos estudios que evalúan la efectividad de los métodos tradicionales de evaluación de agregados frente a la RAS para el caso de los AGR [58,59]. Estos señalan algunas consideraciones especiales a la hora de evaluar los AGR, por sus distintas propiedades: por ejemplo, el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674 [60], ASTM C1260 [61]), tritura todo el agregado grueso generando un agregado fino para la elaboración del mortero. En el caso del AGR, las sucesivas

trituras generen una gran cantidad de material “fino” a partir del mortero adherido, por lo que el agregado fino resultante no sería representativo de las propiedades del agregado grueso original. Por eso algunos autores recomiendan analizar por separado el agregado natural presente en el AR del mortero adherido en él [58]. Finalmente, en cuanto a las reglamentaciones vigentes, existen algunas que limitan el uso de AR proveniente de hormigones afectados por la RAS, como el EHE 2008 [62], mientras que otras consideran que el AR debe ser evaluado como cualquier otro agregado natural [63,64].

### - Congelamiento y deshielo

La durabilidad vinculada a los ciclos de congelamiento y deshielo se encuentra fuertemente vinculada con la estructura de poros del hormigón, dado que es en el interior de ellos que se genera la cristalización del agua y las presiones internas que producen el daño. La práctica más eficiente para anular el ataque por congelamiento es el uso de aditivos incorporadores de aire. El diseño de una matriz cerrada (baja relación agua-cemento y uso de MCSs) contribuye a limitar el ingreso de agua por capilaridad, moderando el ataque.

El tema de congelamiento y deshielo es uno de los problemas de durabilidad con mayor cantidad de bibliografía existente en el campo del HR, pero paradójicamente, es un tema en el que pueden encontrar conclusiones muy diferentes entre sí. Muchos autores han señalado un buen desempeño de hormigones con AGR [10,65–69], e inclusive han reportado una mejor resistencia al ataque por congelamiento que sus respectivos hormigones convencionales de referencia. Por otro lado, varios autores han señalado que el uso de AR tiene un impacto negativo en la resistencia al congelamiento y deshielo del HR [70–72].

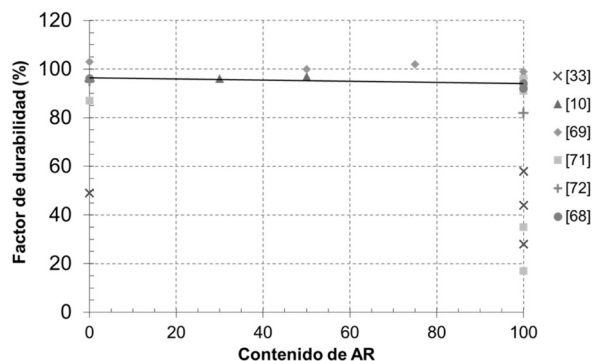
Es posible que los diferentes resultados sean debidos a los diversos factores que inciden en la performance de cualquier hormigón en la resistencia al congelamiento. La participación del

AR, sus propiedades y la influencia del mortero adherido no han sido del todo comprendidas aún, y por ende no existe un consenso en cuanto a su desempeño. Gokce et al. [71] elaboró primero ARs a partir de hormigones de laboratorio, con y sin aire incorporado, para luego a partir de estos elaborar HR con aire incorporado, y distintas relaciones a/c. En los hormigones con AR con aire incorporado observó un efecto nulo e incluso positivo, mientras que en los hormigones con AR sin aire incorporado encontró un efecto negativo, aún para bajas cantidades de reemplazo y baja relación a/c. Estudios microscópicos confirmaron que el mortero adherido en los AR tuvo un rol protagonista en la formación y propagación de fisuras por el ataque del congelamiento. La utilización en escalas industriales de AR, donde la calidad de los hormigones de origen es variada y muchas veces desconocida, hace prácticamente imposible la utilización de solo AR con aire o sin aire incorporado, por lo cual es conveniente estudiar el peor de los casos. Zega et al. [69], evaluaron HRs con 0, 50, 75 y 100% de AGR (sin aire incorporado), con una matriz diseñada para resistir el ataque por congelamiento y deshielo (relación a/c = 0,35; aire intencionalmente incorporado), según el procedimiento indicado en la norma ASTM C 666 [73]. Luego de los 300 ciclos de congelamiento y deshielo, observaron un desempeño satisfactorio en todas las mezclas evaluadas, aún en aquellas con 100% de AGR. En la Figura 3 se presentan los factores de durabilidad informados en la literatura para hormigones con distintos contenidos de AGR, obtenidos luego de realizarle los 300 ciclos de congelamiento y deshielo.

Algunos autores señalan posibles métodos para mejorar la resistencia al ataque por congelamiento y deshielo, como la utilización de adiciones puzolánicas o una baja relación a/c, que garanticen una baja permeabilidad del hormigón, la utilización de fibras sintéticas, o el mejoramiento del AR mediante la reducción del contenido de mortero adherido o la reducción del tamaño máximo de partícula. Sin embargo, todos estos métodos



tienen efectos menores frente a la utilización de aditivos incorporadores de aire, la cual es una práctica que debe realizarse sin excepciones a la hora de elaborar hormigones expuestos a dichas condiciones.



**Figura 3.** Factor de durabilidad del hormigón vs contenido de AGR

### - Exposición a altas temperaturas

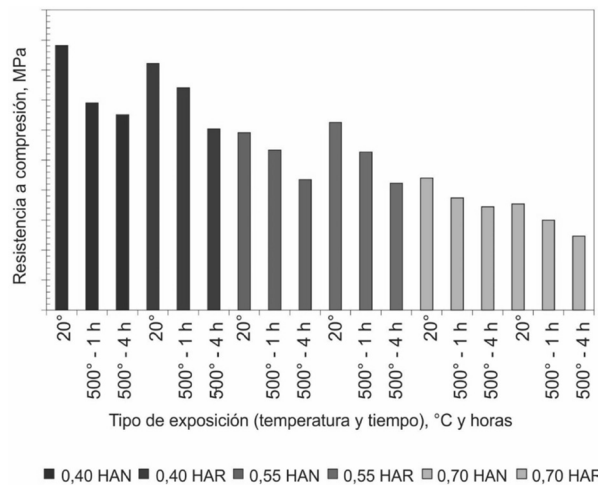
La exposición a altas temperaturas puede modificar las propiedades físicas y químicas del hormigón, produciendo cambios volumétricos y fisuración que resultan en una caída de sus propiedades mecánicas. El desempeño de hormigones convencionales expuestos a altas temperaturas ha sido ampliamente estudiado [74–78]. Las principales propiedades del hormigón que influyen en su resistencia a las altas temperaturas son la porosidad de la pasta y la mineralogía de los agregados [79,80]. Además, las condiciones de exposición, como temperatura máxima, tiempo de exposición y tasa de enfriamiento, ejercen un rol principal en la mecánica del daño de los hormigones expuestos, lo que condiciona los métodos de evaluación en laboratorio [81,82]. La diferente microestructura de los HRs conduce a pensar un diferente desempeño frente a este tipo de exposición. El contenido de mortero adherido en las partículas del AR puede hacer que el coeficiente de expansión térmica del mismo no difiera tanto del de la matriz del HR, como sí sucede en un hormigón convencional. Esto resultaría en una deformación más solidaria entre la matriz y el

agregado, y en una menor generación de tensiones y fisuración en la zona de interfase.

Zega y Di Maio [83] evaluaron hormigones de diferentes relaciones a/c elaborados con agregado granítico, natural y reciclado (en un 75%), expuestos a 500°C durante 1 y 4 horas, y enfriados lentamente. Tras evaluar el desempeño mediante cambios en los módulos de elasticidad dinámico y estático, velocidad del pulso ultrasónico y resistencia a compresión, llegaron a la conclusión de que los hormigones con AR tuvieron un similar o mejor desempeño que los hormigones con AN. Este mejor desempeño fue más evidente en tiempos cortos de exposición (1 hora) que en tiempo prolongados (4 horas). La Figura 4 muestra las disminuciones en la resistencia a compresión de los distintos hormigones como consecuencia de la exposición a alta temperatura durante los diferentes periodos de tiempo. En otro trabajo de los mismos autores [84], evaluaron HR producidos con AGR conteniendo distintos tipos de agregados naturales (granítico, cuarcítico y silíceo). Tras ser expuestos a 500°C por el lapso de 1 hora, se observaron otra vez mejores desempeños en los HRs, sobre todo para bajas relaciones a/c. Asimismo, los autores no encontraron diferencias significativas entre los distintos HR debido al uso de diferentes agregados naturales. Esto puede ser explicado por la mayor cantidad de mortero que aporta el AR, que por un lado mejora la compatibilidad entre la expansión térmica del agregado y la matriz, mientras que por otro lado “diluye” la cantidad total de agregado natural en el HR.

De estos estudios surge como principal conclusión que el HR tiene igual o mejor desempeño que los hormigones convencionales luego de su exposición a alta temperatura. Otros estudios en la literatura coinciden con esta hipótesis [85–88]. En términos generales, se puede decir que hormigones con contenidos de AR entre 20 y 100%, expuestos a temperaturas entre 200 y 800°C, y por periodos de tiempo de 1 y 4 horas, han tenido iguales o mejores desempeños que sus respectivos hormigones de referencia. Por su parte, Gupta et al. [89] ha

reportado que en todos los casos los HRs tuvieron peor desempeño que su respectivo hormigón de referencia, incluso habiendo pre-tratado el AR.



**Figura 4.** HAN/HAR con diferentes relaciones a/c expuestos a altas temperaturas [83].

## COMENTARIOS FINALES

En este artículo se presentó una revisión del efecto del agregado reciclado (AR) en la durabilidad de del hormigón reciclado (HR). Fueron considerados los fenómenos de penetración de cloruros, ataque por sulfatos, reacción álcali-sílice, congelamiento y deshielo y exposición a altas temperaturas. A pesar de la mayor porosidad de los HRs, en ningún caso se observó un resultado contundente que

caracterice como inconveniente el uso del AR.

El efecto negativo del aumento de la porosidad es compensado en forma parcial por otras propiedades del AR que impactan en forma positiva, según el mecanismo involucrado, en la durabilidad del nuevo hormigón. Ya sea por un aumento en la capacidad de fijación de iones agresivos, por una reducción de la restricción interna o una mejor compatibilidad térmica, el uso de AR no significa necesariamente una caída en las propiedades durables del HR. Valores de reemplazo de AN por AR de hasta 25% son los usualmente encontrados en la literatura como recomendables para alcanzar hormigones de buenas prestaciones durables. Sin embargo, en determinados casos se han cumplido satisfactoriamente exigencias prestacionales de durabilidad en hormigones con reemplazos de hasta un 100%.

Si bien de la mayoría de los estudios analizados surge como conclusión que es posible elaborar hormigones reciclados con satisfactorias condiciones de durabilidad, mayores investigaciones son necesarias a fin de conocer en profundidad la participación del AR, y de sus propiedades, en los diferentes mecanismos vinculados a la durabilidad. Una mayor comprensión de la misma permitirá elaborar HR en forma más eficiente y durables a los ambientes agresivos.

## REFERENCIAS

- 1.- Etcheberria Larrañaga, M. (2004) Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, 230p
- 2.- Hansen, T.C. (1986) Recycled aggregates and recycled aggregate concrete. Seibd - State Tge Art Rep. Dev. 1945-1985 RILEM Tech. Committee 37-DRC Mater Struct, 19 (111), 201-246.
- 3.- Nixon, P.J. (1978) Recycled concrete as an aggregate for concrete - a review. Mater. Constr., 11 (65), 371-378.

- 4.- Sánchez de Juan, M. (2004) Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, 502p.
- 5.- Rasheeduzzafar, y Khan, A. (1984) Recycled concrete - a source for new aggregate. *Cem. Concr. Aggreg.*, 6 (1), 17-27.
- 6.- Padmini, A.K., Ramamurthy, K., y Mathews, M.S. (2009) Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*, 23 (2), 829-836.
- 7.- Sánchez de Juan, M., y Alaejos Gutiérrez, P. (2009) Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.*, 23 (2), 872-877.
- 8.- Hansen, T.C., y Narud, H. (1983) Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concr. Int.*, 5 (1), 79-83.
- 9.- Sri Ravindrarajah, R., y Tam, C.T. (1985) Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Mag. Concr. Res.*, 37 (130), 29-38.
- 10.- Limbachiya, M.C., Leelawat, T., y Dhir, R.K. (2000) Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Mater. Struct.*, 33 (9), 574-580.
- 11.- Zega, C.J., y Di Maio, A. (2003) Influencia de las características de los agregados reciclados en la elaboración de hormigones. *Proc XV Reunión Téc. Semin. Hormigones Espec. AATH, Santa Fé, Argentina*.
- 12.- Topçu, İ.B., y Şengel, S. (2004) Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cem. Concr. Res.*, 34 (8), 1307-1312.
- 13.- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., y Barra, M. (2007) Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Res.*, 37 (5), 735-742.
- 14.- Gómez Soberón, J.M.V., Agulló Fité, L.I., y Vázquez Romanich, E. (2002) Cualidades Físicas y Mecánicas de los Agregados Reciclados de Concreto. *Aplicación en Concretos. Tecnol. Constr.*, XIII-157, 10-22.
- 15.- Tabsh, S.W., y Abdelfatah, A.S. (2009) Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Constr. Build. Mater.*, 23 (2), 1163-1167.
- 16.- Kwan, W.H., Ramli, M., Kam, K.J., y Sulieman, M.Z. (2011) Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Constr. Build. Mater.*, 26, 565-573.
- 17.- Di Maio, A., Giaccio, G., y Zerbino, R. (2002) Hormigones con agregados reciclados. *Cienc. Tecnol. Hormig. LEMIT*, 9, 5-10.

- 18.- Di Maio, A., Zega, C.J., y Traversa, L.P. (2005) Estimation of compressive strength of recycled concretes with the ultrasonic method. *J. ASTM Int.*, 2 (5), 8p.
- 19.- Zega, C.J., y Di Maio, A. (2007) Efecto del agregado grueso reciclado sobre las propiedades del hormigón. *Bol Téc IMME*, 45 (2), 1-11.
- 20.- Otsuki, N., Miyazato, S., y Yodsudjai, W. (2003) Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete. *J. Mater. Civ. Eng.*, 15 (5), 443-451.
- 21.- Gómez Soberón, J.M.V. (2002) Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate An experimental study. *Cem. Concr. Res.*, 32, 1301-1311.
- 22.- Neville, A. (1995) Chloride attack of reinforced concrete: an overview. *Mater. Struct.*, 28 (2), 63-70.
- 23.- Collepardi, M., Marcialis, A., y Turriziani, R. (1972) Penetration of chloride ions into cement pastes and concretes. *J. Am. Ceram. Soc.*, 55 (10), 534-535.
- 24.- Tang, L., y Nilsson, L.O. (1993) Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars. *Cem. Concr. Res.*, 23 (2), 247-253.
- 25.- Gonçalves, A., Esteves, A., y Vieira, M. (2004) Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability. *Proc Int RILEM Conf Use Recycl. Mater. Build. Struct.*, 9-11 Noviembre 2004, Barcelona, España. 554-562.
- 26.- Kou, S.C., Poon, C.S., y Chan, D. (2007) Influence of Fly Ash as Cement Replacement on the Properties of Recycled Aggregate Concrete. *J. Mater. Civ. Eng.*, 19 (9), 709-717.
- 27.- Tanaka, K., Yada, K., Maruyama, I., Sato, R., y Kawai, K. (2004) Study on corrosion of reinforcing bar in recycled aggregate concrete. *Proc Int RILEM Conf Use Recycl. Mater. Build. Struct.*, 9-11 Noviembre 2004, Barcelona, España., 634-650.
- 28.- Villagrán-Zaccardi, Y.A., Zega, C.J., y Di Maio, Á.A. (2008) Chloride Penetration and Binding in Recycled Concrete. *J. Mater. Civ. Eng.*, 20 (6), 449-455.
- 29.- ASTM C 1202 (1997) Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
- 30.- Zega, C.J., Villagrán-Zaccardi, Y.A., y Maio, Á.A.D. (2015) Chloride diffusion in recycled concretes made with different types of natural coarse aggregates. *Proc Int. Conf. Sustain. Struct. Concr.*, 392-402.
- 31.- Ann, K.Y., Moon, H.Y., Kim, Y.B., y Ryou, J. (2008) Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials. *Waste Manag.*, 28 (6), 993-999.
- 32.- Hwang, J.P., Shim, H.B., Lim, S., y Ann, K.Y. (2013) Enhancing the durability properties of concrete containing recycled aggregate by the use of pozzolanic materials. *KSCE J. Civ. Eng.*, 17 (1), 155-163.

- 33.- Kou, S.-C., y Poon, C.-S. (2013) Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. *Cem. Concr. Compos.*, 37, 12-19.
- 34.- Saravanakumar, P., y Dhinakaran, G. (2014) Durability aspects of HVFA-based recycled aggregate concrete. *Mag. Concr. Res.*, 66 (4), 186-195.
- 35.- Corinaldesi, V., y Moriconi, G. (2009) Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*, 23 (8), 2869-2876.
- 36.- Kou, S.C., y Poon, C.S. (2012) Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Constr. Build. Mater.*, 35, 69-76.
- 37.- Irassar, E.F. (2001) Ataque químico al hormigón, en *Durabilidad del hormigón estructural*, AATH, pp. 97-156.
- 38.- Xiao, J., Li, L., Tam, V.W.Y., y Li, H. (2014) The state of the art regarding the long-term properties of recycled aggregate concrete. *Struct. Concr.*, 15 (1), 3-12.
- 39.- Dhir, R.K., Limbachiya, M.C., Leelawat, T. (1999) Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS-5328 designated mixes. *Proc. Inst. Civ. Eng. - Struct. Build.*, 134 (3), 257-274.
- 40.- Bulatović, V., Melešev, M., Radeka, M., Radonjanin, V., y Lukić, I. (2017) Evaluation of sulfate resistance of concrete with recycled and natural aggregates. *Constr. Build. Mater.*, 152, 614-631.
- 41.- Somna, R., Jaturapitakkul, C., y Amde, A.M. (2012) Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Compos.*, 34 (7), 848-854.
- 42.- Lee, S.T. (2009) Influence of recycled fine aggregates on the resistance of mortars to magnesium sulfate attack. *Waste Manag.*, 29 (8), 2385-2391.
- 43.- Lee, S.T., Swamy, R.N., Kim, S.-S., y Park, Y.-G. (2008) Durability of Mortars Made with Recycled Fine Aggregates Exposed to Sulfate Solutions. *J. Mater. Civ. Eng.*, 20 (1), 63-70.
- 44.- Santillán, L.R., Zaccardi, Y.A.V., y Zega, C.J. (2018) Assessment of the influence of recycled aggregate on the resistance to External Sulfate Attack by accelerated testing of mortar bars. *Proc. 4th Int. Conf. Serv. Life Des. Infrastruct. SLD4*, 10p.
- 45.- Santhanam, M., Cohen, M.D., y Olek, J. (2003a) Mechanism of sulfate attack: A fresh look Part 1: Summary of experimental results. *Cem. Concr. Res.*, 32, 915-921.
- 46.- Whittaker, M., y Black, L. (2015) Current knowledge of external sulfate attack. *Adv. Cem. Res.*, 27 (9), 532-545.
- 47.- Shayan, A., y Xu, A. (2003) Performance and Properties of Structural Concrete Made with Recycled Concrete Aggregate. *ACI Mater. J.*, 100 (5), 371-380.

- 48.-Corral-Higuera, R., Arredondo-Rea, S.P., Neri-Flores, M.A., Gómez-Soberón, J.M., Almeraya-Calderón, F., Castorena-González, J.H., y Almaral-Sánchez, J.L. (2011) Sulfate attack and reinforcement corrosion in concrete with recycled concrete aggregates and supplementary cementing materials. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6, 613-621.
- 49.- Zhao, Z., Wang, S., Lu, L., y Gong, C. (2013) Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar. *Constr. Build. Mater.*, 43, 191-196.
- 50.- Neville, A. (2004) The confused world of sulfate attack on concrete. *Cem. Concr. Res.*, 34 (8), 1275-1296.
- 51.- Haynes, H., O'Neill, R., y Mehta, P.K. (1996) Concrete deterioration from physical attack by salts. *Concr. Int.*, 16 (1), 63-68.
- 52.- Irassar, E.F., Di Maio, A.A., y Batik, O.R. (2010) Deterioro del hormigón por cristalización de sales. VI Congr. Int. Sobre Patol. Recuperación Estruct., Córdoba, Argentina, 17p.
- 53.- Zega, C.J., Coelho Dos Santos, G.S., Villagrán-Zaccardi, Y.A., y Di Maio, A.A. (2016) Performance of recycled concretes exposed to sulphate soil for 10 years. *Constr. Build. Mater.*, 102, 714-721.
- 54.- Midness, S. y Young, J.F. (1981) Concrete. Prentice-Hall, Inc., 671p.
- 55.- Sánchez de Juan, M., y Alaejos Gutiérrez, P. (2004) Influence of recycled aggregate quality on concrete properties. *Proc Int RILEM Conf Use Recycl. Mater. Build. Struct*, 9-11 Noviembre 2004, Barcelona, España, 545-553.
- 56.- Etxeberria, M., y Vázquez, E. (2010) Reacción álcali sílice en el hormigón debido al mortero adherido del árido reciclado. *Mater. Constr.*, 60 (297), 47-58.
- 57.- Shehata, M.H., Christidis, C., Mikhaiel, W., Rogers, C., y Lachemi, M. (2010) Reactivity of reclaimed concrete aggregate produced from concrete affected by alkali-silica reaction. *Cem. Concr. Res.*, 40 (4), 575-582.
- 58.- Johnson, R., y Shehata, M.H. (2016) The efficacy of accelerated test methods to evaluate Alkali Silica Reactivity of Recycled Concrete Aggregates. *Constr. Build. Mater.*, 112, 518-528.
- 59.- Barreto Santos, M., de Brito, J., y Santos Silva, A. (2009) Métodos de evaluación de las reacciones álcali-sílice en hormigones con áridos reciclados Evaluation methods of alkali-silica reaction in concrete with recycled aggregates. *Rev. Ing. Constr.*, 24 (2), 141-152.
- 60.- IRAM 1674 (1997) Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero.
- 61.-ASTM C 1260 (2001) Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method).



- 62.- EHE-08 (2008) Instrucción de Hormigón Estructural. Anejo 15, Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados.
- 63.- BS EN 12620 (2002) Aggregates for concrete. European Committee for Standardization.
- 64.- DIN 4226-100 (2002) Aggregates for mortar and concrete, Part 100: recycled aggregates. Deutsche Norm, pp. 18.
- 65.- Konno, K., Sato, Y., Katsura, O., y Kumagai, M. (2002) Influence of absorption of coarse aggregate on frost resistance and strength of recycled concrete. Proc. 1st FIB-Congress Concr. Struct. 21st Century, 139-144.
- 66.- Abbas, A., Fathifazl, G., Isgor, O.B., Razaqpur, A.G., Fournier, B., y Foo, S. (2009) Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method. Cem. Concr. Compos., 31 (8), 555-563.
- 67.- Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., y Degeimbre, R. (2010) Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. Cem. Concr. Compos., 32 (6), 421-426.
- 68.- Richardson, A., Coventry, K., y Bacon, J. (2011) Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete. J. Clean. Prod., 19 (2-3), 272-277.
- 69.- Zega, C.J., Taus, V.L., Villagrán Zaccardi, Y.A., y Di Maio, A. (2005) Comportamiento físico-mecánico de hormigones sometidos a reciclados sucesivos. Proc. Simp. Fib El Hormig. Estructural El Transcurso Tiempo, La Plata, Argentina, 761-768.
- 70.- Dai, W., Sun, W.M., y Miu, H.L. Experimental study on freeze-thaw durability of recycled concrete. Concrete, 8, 69-71.
- 71.- Gokce, A., Nagataki, S., Sacki, T., y Hisada, M. (2004) Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete. Cem. Concr. Res., 34 (5), 799-806.
- 72.- Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., y Wirquin, E. (2004) Frost resistance of recycled aggregate concrete. Cem. Concr. Res., 34 (10), 1927-1932.
- 73.- ASTM C 666 (2003) Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.
- 74.- Malhotra, H.L. (1956) The effect of temperature on the compressive strength of concrete. Mag. Concr. Res., 8 (23), 85-94.
- 75.- Zoldners, N.G. (1971) Thermal properties of concrete under sustained elevated temperatures. ACI, SP-25, 1-32.

- 76.- Bazant, Z.P., y Kaplan, M.F. (1996) Concrete at high temperatures. Material properties and mathematical models. Burnt Mill Harlow Essex Engl. Logman House.
- 77.- FIB (2002) Fire. Management, maintenance and strengthening of concrete structures. Bulletin 17, Appendix 6, pp. 133-152.
- 78.- Denoël, J.F. (2007) Fire safety and concrete structures, 90p.
- 79.- Barragán, B., Di Maio, A., Giaccio, G., Traversa, L.P., y Zerbino, R. (1999) Hormigones elaborados con distintos tipos de agregado expuestos a altas temperaturas. *Cienc. Tecnol. Hormig. LEMIT*, 7, 27-41.
- 80.- Netinger, I., Kesegic, I., y Guljas, I. (2011) The effect of high temperatures on the mechanical properties of concrete made with different types of aggregates. *Fire Saf. J.*, 46, 27-41.
- 81.- Khoury, G.A. (2000) Effect of fire on concrete and concrete structures. *Prog. Struct. Eng. Mater.*, 2 (4), 429-447.
- 82.- Husem, M. (2006) The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete. *Fire Saf. J.*, 41 (2), 155-163.
- 83.- Zega, C.J., y Di Maio, A.A. (2006) Recycled concrete exposed to high temperatures. *Mag. Concr. Res.*, 58 (10), 675-682.
- 66 84.- Zega, C.J., y Di Maio, A. (2009) Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature. *Constr. Build. Mater.*, 23 (5), 2047-2052.
- 85.- Xiao, J.Z., y Zhang, C.Z. (2007) Fire Damage and Residual Strengths of Recycled Aggregate Concrete. *Key Eng. Mater.*, 348-349, 937-940.
- 86.- Vieira, J.P.B., Correia, J.R., y de Brito, J. (2011) Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. *Cem. Concr. Res.*, 41, 533-541.
- 87.- Kou, S.C., Poon, C.S., y Etcheberria, M. (2014) Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled concrete coarse aggregates. *Cem. Concr. Compos.*, 53, 73-82.
- 88.- Adebakin, I.H., y Ipaye, T.O. (2016) Effect of elevated temperature on the compressive strength of recycled aggregate concrete. *Res J Eng Sci*, 5 (9), 1-4.
- 89.- Gupta, A., Ghosh, S., y Mandal, S. (2012) Coated recycled aggregate concrete exposed to elevated temperature. *Glob. J. Res. Eng. Civ. Struct. Eng.*, 12 (3), 7.